

Untersuchungen von Schwingungsdämpfungsmethoden bei magnetgelagerten Rotoren

P.Wurmsdobler, R. Siegwart, R. Herzog
MECOS Traxler AG, CH-8400 Winterthur, Schweiz

In dieser Arbeit wird der Versuch unternommen, das Konzept der "Feedforward Control" zur Dämpfung von unwuchterregten Schwingungen anhand zweier Versuchsstände zu verifizieren. Bislang war "Feedback Control", wie etwa ein Notch-Filter, ein meist verwendetes Mittel zur Bekämpfung von harmonischen Schwingungen, die in der praktischen Anwendung dominieren. In einer Meßreihe konnte gezeigt werden, daß es mit der "Feedforward-Strategie" nunmehr möglich ist, sowohl Auslenkungen als auch Lagerkräfte gleichzeitig wesentlich zu reduzieren. Ein Durchfahren von kritischen Drehzahlen ist mit dieser Methode ebenso möglich, wie ein annähernd kräftefreier Lauf bei höchsten Drehzahlen.

Kapitel 1

Einleitung

Magnetlager finden immer häufiger Anwendung in Rotorsystemen, vor allem der Kostenreduktion wegen, die die Digitaltechnik in den letzten Jahren erfahren hat. Die Anwendungsbereiche liegen vorwiegend in der Lagerung von schnelllaufenden Rotoren. Diese bringen das Problem von Schwingungen, verursacht durch Unwuchten, und deren Dämpfungen mit sich. Hier kommen aber die Vorteile des aktiv geregelten Magnetlagers zum tragen.

Zum einen können die Steifigkeit und die Dämpfung des Lagers frequenzabhängig eingestellt werden. Will man die Auslenkungen eines Rotors minimieren, so bedingt ein Erhöhen der Steifigkeit aber eine Erhöhung der Lagerkräfte und vice versa, dies vor allem bei hohen Drehzahlen, oder beim Durchfahren von kritischen Drehzahlen. Das heißt, mit einem "feedback" Zugang kann das Problem der Schwingungsdämpfung nicht wesentlich gelöst werden. Vielmehr sollte man Information über das System, z. B. die Drehzahl, benutzen, um das Schwingungsverhalten zu beeinflussen. Das geschieht in einer Feedforward-Kompensation (ffwd-Kompensation).

Geht man davon aus, daß die Unwucht eine harmonische Erregung des Systems mit einer bekannten Frequenz ist, so kann dieses Wissen in einer Art Störgrößenmaufschaltung verwendet werden. Es wird ein harmonisches Signal, das bis auf die Amplitude und Phasenlage unbestimmt ist, in das geschlossene System eingespeist. Die Amplitude und Phase des ffwd-Signals (ffwd-Parameter) kann aber für jedes System empirisch gefunden werden, je nachdem, ob die Lagerkräfte oder die Verschiebungen des Rotors minimiert werden sollen. Beide Parameter sind aber frequenzabhängig. Es zeigt sich, daß in beiden Fällen die Auslenkung des Rotors und die Lagerkräfte gleichzeitig minimiert werden können. Ein entscheidender Vorteil dieser Strategie ist, dasz bloß die Frequenz der Unwuchterregung bekannt sein muß, was technisch leicht zu realisieren ist, nicht aber deren Amplitude und Phase, also die Größe und Lage der Unwucht. Somit bietet die ffwd-Kompensation ein potentes Mittel zur Schwingungsdämpfung.

Kapitel 2

Analytische Bestimmung der Parameter

Um die Parameter analytisch bestimmen zu können, soll ein einfaches, formales Modell eines geregelter Systems, bestehend aus Strecke und Regler, betrachtet werden. Beide sind zu einem geschlossen System gekoppelt, mit dem Reglerausgang als Streckeneingang, und umgekehrt. Es gibt allerdings zwei Möglichkeiten, ein ffd-Signal in den geschlossenen Wirkungsablauf einzuspeisen. Vor dem Regler als Positionssignal oder nach dem Regler als zusätzliches Stellsignal. Bild 2 zeigt beide Möglichkeiten in einer Darstellung dieses Systems.

Die externe Erregung, ein harmonische Erregung, bildet einen zweiten Eingang in das System Strecke. Als bekannt werden die Frequenz, oder die Frequenzen der Erregung vorausgesetzt, für die analytische Berechnung natürlich auch die Amplitude sowie die Phasenlage.

Die Übertragungsfunktion der Strecke wird durch

$$G = (G_1(s), G_2(s))$$

bestimmt. Der Eingangsvektor

$$f = \begin{pmatrix} f_{Err} \\ f_{ffd} \end{pmatrix}$$

besteht aus der Unwuchterregung f_{Err} und der Lagerkraft f_{lag} , die sich aus der Summe der feedback-Kraft f_{fbk} und der ffd-Kraft f_{ffd} ergibt. Ausgangsgröße ist Verschiebungsvektor x mit

$$x = G f.$$

Abbildung 2.1: Blockschaltbild eines einfachen Magnetlagersystems

G_1 und G_2 bezeichnen somit die Übertragungsfunktionen der Eingangsgrößen auf die Ausgangsgröße x . Eingang in den Regler mit der Übertragungsfunktion C ist die Differenz von x und dem ffwd-Positionssignal x_{ffwd} . Das System Magnetlager ist in diesem vereinfachten Schema als linearisiertes Modell dem System Regler einverleibt worden.

Neben den zwei Möglichkeiten der ffwd-Einspeisung gibt es zudem noch zwei verschiedene Ziele für die ffwd-Kompensation, einerseits die Lagerkraft zu minimieren, oder die Auslenkungen verschwinden zu lassen. Es ergeben sich also vier Möglichkeiten der Bestimmung der optimalen ffwd-Parameter. Um die Parameter analytisch berechnen zu können, kann jeweils ein ffwd-Signal weggelassen werden. Mit der Annahme, daß die Auslenkung, respektive die Lagerkraft identisch Null sind, können dann Bedingungen für die ffwd-Parameter angeschrieben werden.

ng, f_{ffwd} Lagorkraft Sollte die Lagerkraft verschwindend klein werden, bedeutet dies, daß der Reglerausgang für jede Zeit Null sein muß. Die Funktion für das ffwd-Signal lautet dann

$$x_{ffwd} = G_1 f_{Err}.$$

Das ffwd-Signal ist somit nur von der Übertragungsfunktion G_1 der Erregung zum Ausgang des Rotors, nicht aber vom Regler, abhängig. Die ffwd-Phase erfährt einen Sprung bei den Polen von G_1 .

Position Wird eine Auslenkung von Null angestrebt, so liefert eine kleine Rechnung, daß

$$x_{ffwd} = -\frac{G_1}{G_2 C} f_{Err}$$

gewählt werden muß. Erstaunlicher Weise fallen die gemeinsamen Pole der Funktionen G_1 und G_2 heraus, und die Nullstellen von G_2 werden zu den neuen Polen. Der Phasensprung tritt jetzt bei den Nullstellen, die den Polen des gefesselten Systems entsprechen, auf. Allerdings beeinflußt der Regler den Amplituden und Phasengang der ffwd-Parameter.

ng, x_{ffwd} Lagorkraft Die Summe des ffwd-Signals und des Reglerausgangs soll Null sein. Das ffwd-Signal wird dann zu

$$f_{ffwd} = C G_1 f_{Err}.$$

Da die Auslenkung bei schwach gedämpften Systemen in der Resonanz, d.h. bei den Polen von G_1 , über alle Grenzen wachsen würde, ist das angestrebte Ziel, die Lagerkräfte Null zu machen, freilich nicht mehr möglich, und die ffwd-Parameter würden hier auch vom Regler beeinflußt. So existiert ein feedback Anteil an der Lagerkraft, der sich schwer von der ffwd-Kraft unterscheiden läßt. Dennoch können die Lagerkräfte beträchtlich reduziert werden (siehe Kapitel 3), ohne daß die Auslenkungen verstärkt werden.

Position Ist die Auslenkung Null, liefert der Regler keinen Anteil mehr für die Lagerkraft. Diese kommt alleine vom ffwd-Signal, das sich ergibt zu

$$f_{ffwd} = -\frac{G_1}{G_2} f_{Err}$$

ähnlich wie im Fall oben, fallen die Pole des Systems Rotor heraus, und zusätzlich ergibt sich eine Unabhängigkeit vom Regler.

Der Zusammenhang der Parameter mit der Wahl der Einspeisung beziehungsweise der Ziele läßt sich am besten in einer Tabelle verdeutlichen:

| Wahl | x als fwd | f als fwd |
|----------------|----------------------|--------------------|
| Position = 0 | $-\frac{G_1}{G_2 C}$ | $-\frac{G_1}{G_2}$ |
| Lagerkraft = 0 | G_1 | $C G_1$ |

Um die fwd-Parameter unabhängig vom Regler halten zu können, muß also jeweils eine andere Größe als die zu eliminierende aufgeschaltet werden. Im nächsten Kapitel werden Ergebnisse mit einem einfachen Modell eines Doppelpendels mit Magnetlager und einer Unwuchterregung gezeigt.

Kapitel 3

Beispiel Doppelpendel

Die im vorhergehenden theoretischen Aussagen sollen anhand eines einfachen Doppelpendels verifiziert werden. Bild 3 zeigt den Versuchsaufbau.

Das Doppelpendel soll ein Modell für einen Rotor auf Magnetlagern sein. Die Steifigkeit des "Lagers" bildet sich aus der des Magnetlagers und der stabilisierenden Wirkung der Schwerkraft. Die Dämpfung kommt fast ausschließlich vom aktiven Magnetlager. Der elastische Rotor wird durch eine Blattfeder dargestellt, deren Länge die Wellensteifigkeit bestimmt. Das starre Pendel stellt somit die Lagerzapfen dar, die kleine Masse an der Blattfeder den Rotor. Hier wirkt auch die Unwucht, welche durch ein kleines "Motörli" erzeugt wird. Der kleine Motor wird von einem Spannungsgenerator gespeist. Die Drehzahl ist somit von der Steuerspannung abhängig. Wird hier von der Drehzahl oder von der Frequenz gesprochen, so entspricht das im praktischen Aufbau einer Spannung. Folglich sind Spannungen anstatt Frequenzen oder Drehzahlen angegeben, die aber drehzahlproportional sind.

Das Magnetlager wird von einem Signalprozessor geregelt, der auch die ffd-Signale hinzuaddiert,

Abbildung 3.1: Doppelpendel mit Magnetlager und Unwuchterregung

und das gesamte Stellsignal dem Leistungsverstärker übergibt. Zur Regelung wird die Position des starren Pendels gemessen. Zusätzlich muß noch die Drehzahl des kleinen Motors gemessen werden, um die Frequenz des ffwd-Signals bestimmen zu können. Mittels einer Schnittstelle zu einem Computer können Daten zum Prozessor geladen werden, als auch Meßdaten vom Speicher des Prozessors geholt werden. Somit konnten die Vorgänge Laden der ffwd-Parameter und Messen, sowie die Optimierung der ffwd-Parameter leicht automatisiert werden.

Es wird hier darauf verzichtet, die für dieses Modell berechneten Gleichungen anzuschreiben. Dies und deren Auswertung geschah schon in einer vorangegangener Arbeit (siehe [1]). Es geht hier vielmehr um die Verifizierung der dort angegebenen Zusammenhänge. Demnach wurde das ffwd-Signal als Kraftsignal aufgeschaltet, um relevante Vergleiche anstellen zu können.

Mit Hilfe der Reglerparameter konnte die Steifigkeit und die Dämpfung des Pendels so eingestellt werden, daß die Eigenfrequenzen des Systems im Drehzahlbereich des Motors zu liegen kamen (0 – 2.5 V). Diese entsprachen etwa Spannungen von 1.25 V und 2.2 V. Der Meßbereich wurde demnach zwischen 0.9 V und 2.4 V gewählt. Die untere Eigenfrequenz entspricht dem Starrkörpermode eines Rotors, die zweite Eigenfrequenz der ersten Biegekritischen. So konnte ein gutes Modell für einen Rotor gewonnen werden, dessen Eigenfrequenzen freilich niedriger lagen als bei einem wirklichen Rotor, was aber nur einen quantitativen Unterschied ausmacht.

3.1 Kompensation der Lagerkraft

Um die optimalen Parameter für das ffwd-Signal zu finden, wurde für jede Frequenz ein Programm verwendet, das das Minimum der Lagerkraft ausmachen kann. Dazu wurde der Reglerstrom gemessen, aufgezeichnet und mit der Norm über der Zeit bewertet. Die Lagerkraft selbst ist proportional zum Reglerstrom. Der Verlauf der Parameter ist im Bild 3.2 ersichtlich.

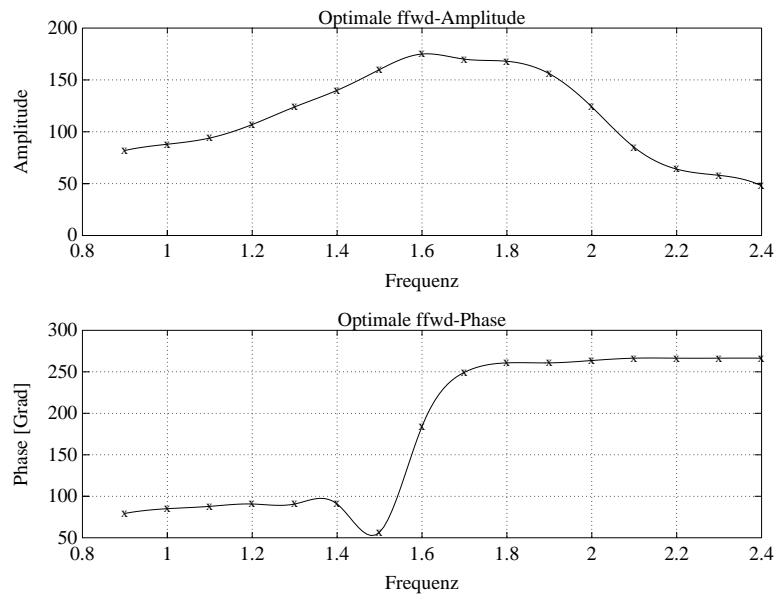


Abbildung 3.2: Optimale ffwd-Parameter bei Variation der Frequenz für minimale Lagerkraft. x markiert Messung mit ffwd, $+$ markiert ohne ffwd.

Wie erwartet gibt es einen Phasensprung bei einem Pol der Strecke bei etwa 1.5. In unteren, als auch oberen Drehzahlbereichen ist die Phase annähernd konstant bis auf den Einfluß des Reglers,

dies auch im Bereich der beiden Eigenfrequenzen des geschlossenen Systems. Erstaunlicher Weise blieben die Auslenkungen hier in gewissen Schranken, obwohl die Lagerkräfte fast zu Null gemacht werden konnten.

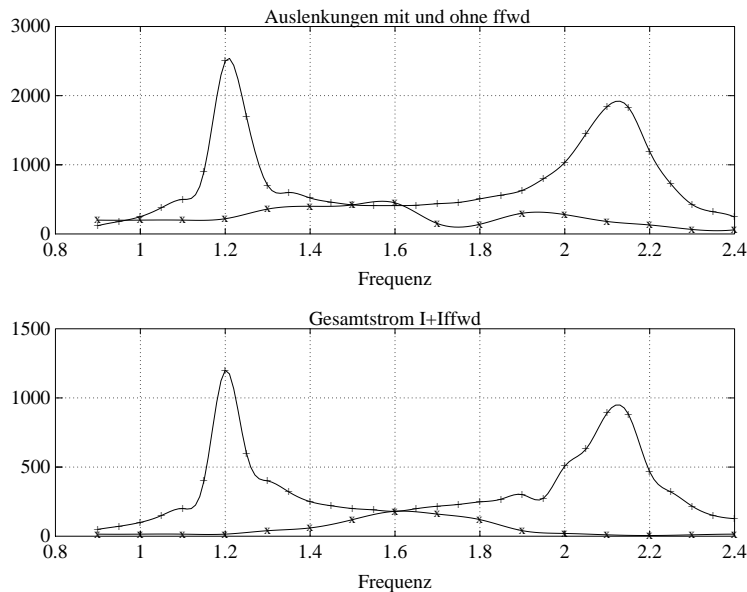


Abbildung 3.3: Auslenkungen und Lagerkräfte bei Variation der Frequenz für minimale Lagerkraft. x markiert Messung mit ffd, $+$ markiert ohne ffd.

Im Bild 3.3 ist der Unterschied zwischen unkompensiertem (mit einem $+$ versehen) und kompensiertem (mit einem x versehen) System deutlich zu sehen. Es gelang also, die Lagerkräfte zu minimieren, gleichzeitig aber die Auslenkungen unter gewissen Schranken zu halten. Die Eigenschaften des geschlossenen Systems bleiben aber trotzdem vollständig erhalten.

In der Praxis wird man aber kaum für jede Drehzahl immer die optimalen ffd-Parameter suchen wollen. Auch ergibt sich im Betrieb eines Rotors (z.B. Frässpindel) eine Drehzahländerung. Die Frage ist also, was passiert, wenn man mit fest eingestellten ("frozen") Parametern die Drehzahl ändert. Dies wird im Bild 3.4 gezeigt.

Die ffd-Parameter wurden für eine Frequenz von 2.2 eingestellt, wo auch das Minimum des Graphen (mit einem x versehen) zu sehen ist. Allein schon aus Bild 3.2 ist zu ersehen, daß die ffd-Parameter in einem kleinen Bereich wenig unterschiedlich sind, vor allem die Phase. Global braucht die Phase bei einer Nullstelle nur um 180 Grad gedreht werden, und man liegt wieder in einem vernünftigen Bereich. es zeigt sich also, daß zwischen zwei Nullstellen des Systems, das ist im Bereich der Resonanzen, konstant gehalten werden können. Diese Tatsache begünstigt die praktische Anwendung der ffd-Methode.

3.2 Kompensation der Auslenkung

Wie im vorigem Abschnitt mit den Reglerströmen wurde hier mit den Auslenkungen verfahren. Bild 3.5 zeigt die optimalen ffd-Parameter für minimale Auslenkung.

Es tritt hier ein Phasensprung bei einer Nullstelle des Systems auf, sowie im vorhergehendem Kapitel gezeigt worden war. Auch sind die ffd-Parameter unabhängig vom Regler, was sich in einem

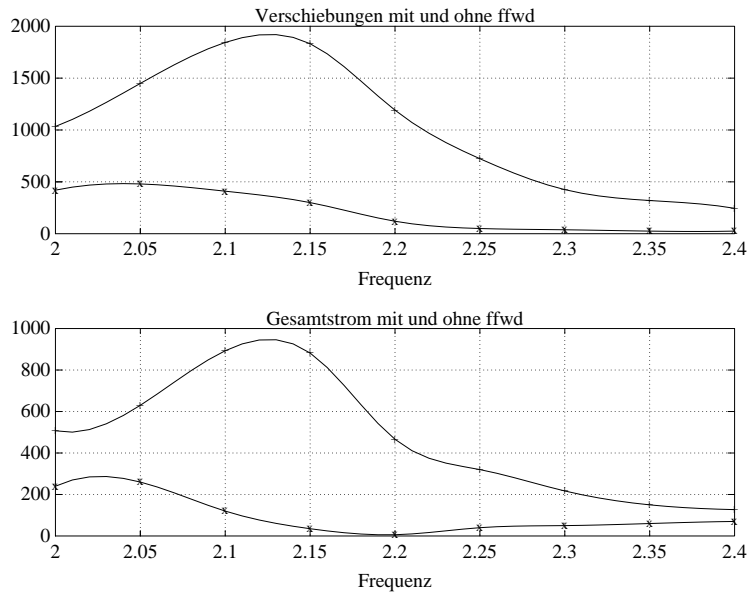


Abbildung 3.4: Variation der Frequenz mit ffd-Parameter für 2.2
x markiert Messung mit ffd, + markiert ohne ffd.

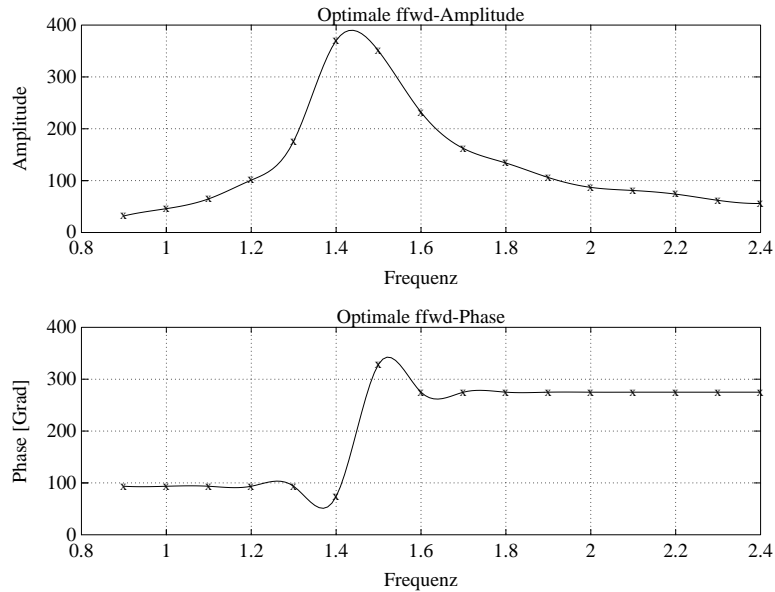


Abbildung 3.5: Optimale ffd-Parameter bei Variation der Frequenz für minimale Auslenkung.
x markiert Messung mit ffd, + markiert ohne ffd.

geraden Verlauf der Phase außerhalb der Nullstelle zeigt. Die sich einstellenden Auslenkungen und Lagerkräfte (proportional zum Reglerstrom) sind im Bild 3.6 zu sehen.

Man sieht, daß es in der Resonanz kaum möglich scheint, die Auslenkungen verschwinden zu lassen. Auch sind die dafür notwendigen Lagerkräfte größer. Analog zum vorigem Abschnitt wurde auch versucht, die ffd-Parameter über mehrere Frequenzen konstant zu halten. Die Ergebnisse sind im

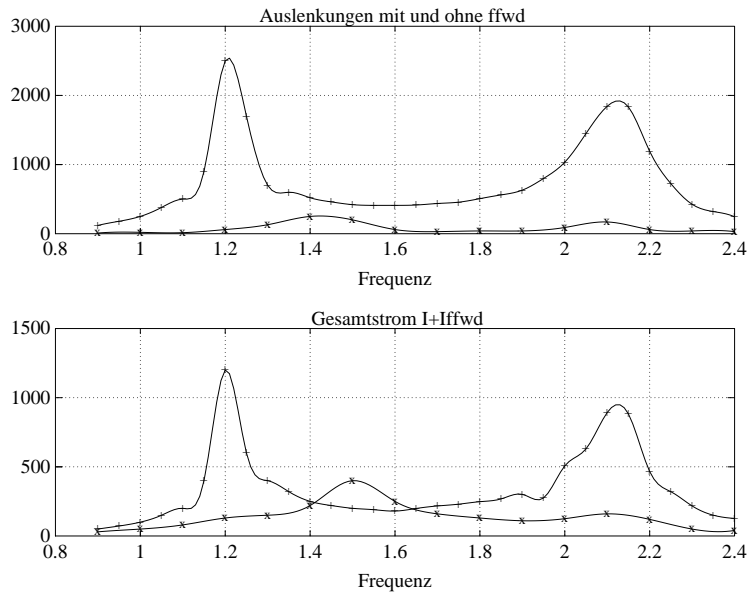


Abbildung 3.6: Auslenkungen und Lagerkräfte bei Variation der Frequenz für minimale Auslenkung. x markiert Messung mit ffw, $+$ markiert ohne ffw.

Bild 3.7 zu sehen.

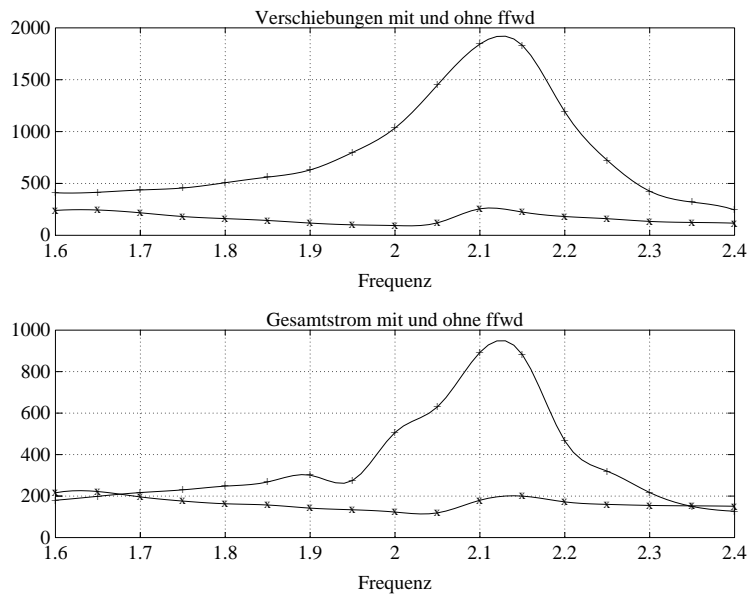


Abbildung 3.7: Variation der Frequenz mit ffw-Paramter für 2. x markiert Messung mit ffw, $+$ markiert ohne ffw.

Vergleicht man die gemessenen Werte mit den in [1] vorhergesagten, so läßt sich eine gute Übereinstimmung erkennen. Sowohl für eine Minimierung der Lagerkräfte, als auch für eine Minimierung der Auslenkungen ließen sich gute Ergebnisse im Vergleich mit den theoretisch bestimmten erzielen. Dies spricht für die Kraft der ffw-Methode.

3.3 Die Kreiseigenschaft

Es wurde in [2] gezeigt, und in [1] verdeutlicht, daß lineare symmetrische AMB-Systeme eine Eigenschaft zeigen, die man Kreiseigenschaft nennt. Für eine Erklärung wird auf diese Arbeiten verwiesen. Um die theoretischen Voraussagen abzurunden, wurde auch diese Eigenschaft nachgewiesen. Ausgehend von den optimalen Parametern für eine gewisse Frequenz (hier gleich 2 gewählt) werden nun die Parameter in einer Parameterebene bei konstanter Frequenz variiert. Alle umliegenden Punkte in der Ebene liefern höhere Auslenkungen respektive Kräfte als die optimalen. Es gibt also eineindeutiges Minimum in der Parameterebene. Zeichnet man die Kontouren der Fläche über der Parameterebene, die als Ordinate die Auslenkungen angibt, so entstehen Kreise. Bild 3.8 zeigt die gemessenen Kreise in einer Ebene. Die Parameter sind nicht in Amplitude und Phase angegeben, sondern in Cosinus und Sinus Anteile gemäß [1] umgerechnet.

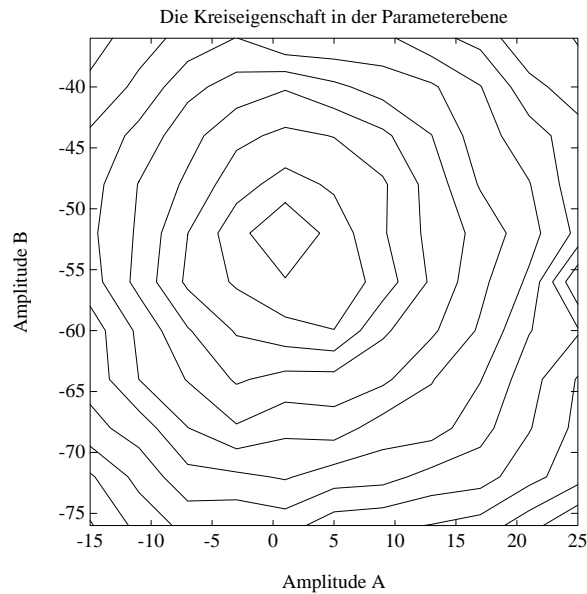


Abbildung 3.8: Kontourlinien gleicher Auslenkung

Kapitel 4

Beispiel Starrer Rotor

Literaturverzeichnis

- [1] R.Larsonneur, R.Siegwart, A. Traxler: *Aktive magnetic bearing control strategies for solving vibration problems in industrial rotor systems*
- [2] R.Larsonneur: *Design and control of aktive magnetic bearing systems for high speed rotation*, Thesis ETH No. 9140, Swiss Federal Institute of Technologie, Zürich, Switzerland, 1990.